

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Dari Stefan Heryanto (2014) melakukan penelitian mengenai “Analisis Pengujian Kinerja Minyak Isolasi Pada Transformator Tenaga 70Kv”. Pengujian karakteristik minyak menurut standar *IEC 60422* dan referensi dari buku S.D Myers. Disisi lain untuk pengujian gas terlarut tersendiri dengan menggunakan metode *Key Gas* dan Metode *TDCG (Total Dissolved Gas Analysis)* yang berdasarkan standar *IEEE std C57.104-2008*, maupun standar PLN.

Hayyudiasto (2015), melakukan penelitian mengenai “Peningkatan Kualitas Minyak Transformator Bekas”. Dalam penelitian ini pengujian minyak dengan memanaskan minyak yang sudah bekas dengan suhu mencapai 80°C, dilihat dari hasil pengujian, tegangan tembus minyak transformator yang dipanaskan mengalami kenaikan rata-rata 32,5kV dari hasil tersebut bahwa fungsi minyak bekas transformator sudah dapat digunakan karena sudah memenuhi sebagai isolator dengan nilai tegangan tembus minimal 30kV.

Irva Khoirunnisa (2018) melakukan penelitian mengenai “Perhitungan Sisa Umur Pemakaian Transformator Daya Pada PLTA Wonogiri Berdasarkan Pengaruh Pembebanan”. Dalam penelitian ini dengan beban 12,644 MW mempunyai perkiraan umur sisa adalah 8 tahun, beban 11,069 MW diperkirakan sisa umurnya 35 tahun dan pada beban 9,064 perkiraan sisa umurnya 130 tahun. Pembebanan yang tinggi akan menyebabkan suhu semakin tinggi dan mengakibatkan sisa umur transformator akan semakin pendek.

Mohammad Shofuan Nur (2018) melakukan penelitian mengenai “Karakteristik Tegangan Tembus Berbagai Macam Merek Oli Pelumas Sepeda Motor”. Pengujian ini menggunakan pelumas oli yang biasa digunakan pada mesin motor. Pengujian kelayakan minyak tersebut dengan mengetahui nilai tegangan tembusnya. Pelumas oli terbagi menjadi beberapa merek seperti, AHM oil SPX1, Motul 4T SCOOTER LE, Enduro Matic, Federal Ultratec Matic. Karena transformator tidak mempunyai suhu tetap, maka pengujian dilakukan menggunakan beberapa perbedaan suhu dari 28°C, 50°C, 70°C, 90°C, 110°C. Pelumas Oli mempunyai tingkat kekentalan adalah SAE 10W-30. Dengan pengujian yang dilakukan selama 6x, didapatkan hasil pengujian dengan nilai tegangan tembus tertinggi, yaitu 35,58 kv, dan nilai tegangan tembus terendah, yaitu 10,75 KV. Sesuai standar standar SPLN 49-1 tahun 1982 adalah nilai tegangan tembus yang dapat digunakan yaitu minimal 30KV untuk golongan C, sedangkan untuk golongan B minimal 50 KV. Dapat disimpulkan bahwa pelumas oli dapat layak digunakan sebagai pendingin dan isolasi jika kapasitas trafo dibawah 70 KV.

Ahmad Qosyariy (2017) melakukan penelitian mengenai “Pengujian Minyak Shell Diala B sebagai Isolator Pada Transformator Berkapasitas 70KV dan 150 KV Dengan Metoda Pengujian Tegangan Tembus, Kadar Air dan Warna Di PLN AP2B Wilayah Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah”. Dalam sistem tenaga listrik, transformator sering mengalami kegagalan termal, maupun kegagalan elektrik. Supaya dapat mengantisipasi kerusakan kegagalan yang terus terjadi pada kondisi tersebut, perlu dilakukan pengujian minyak isolasi berdasarkan beberapa parameter seperti gas terlarut, kadar air, tegangan tembus, dan warna. Pengujian pada trafo 70 KV, nilai *Breakdown Voltage* = 75,3 kV, kadar air = 10,09 ppm, *colour* = D 1,6 (*greener, stronger, darker*), sedangkan trafo 150 KV, nilai *breakdown voltage* = 70kV, kadar air = 8,18 ppm, warna = D 0,0 (*greener, stronger, darker*). Maka jika nilai *breakdown voltage* membesar, maka nilai *water content* semakin kecil.

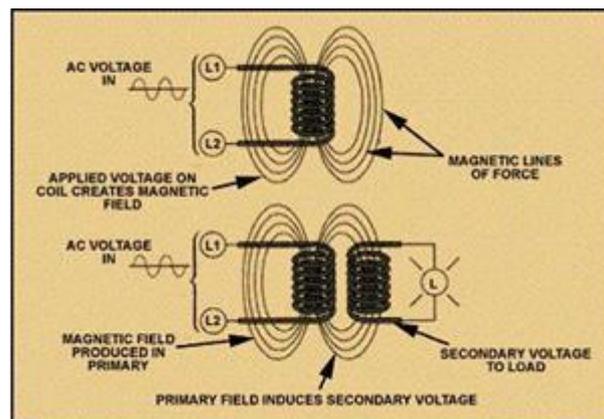
Fahmi Reza (2014) melakukan penelitian mengenai “Analisa Kegagalan Isolasi Minyak Transformator 20 KV”. Dalam penelitian ini, sampel minyak yang diambil mempunyai nilai tegangan tembus yang buruk, yaitu sebesar 12,6 kV/2,5mm. Minyak tersebut sudah dibawah standar SPLN 49-1 untuk trafo distribusi sebesar 30 kV/2,5mm. Penyebab dari nilai kekuatan tegangan tembus yang buruk akan menyebabkan kenaikan suhu yang semakin meningkat, jika minyak tidak mampu meredam maka transformator dapat meledak atau terbakar. Minyak yang buruk tidak dapat mengisolasi, maka akan dengan mudah timbul hubung singkat yang terjadi pada belitan transformator, hubung singkat ini dapat membahayakan kinerja transformator.

Hayyudiasato (2015) melakukan penelitian mengenai “Peningkatan Kualitas Minyak Transformator Bekas”. Dalam penelitian ini, minyak yang digunakan yaitu Shell Diala B, metode yang digunakan untuk peningkatan kualitas minyak dengan cara memanaskan sampel minyak sampai 80°C, kemudian minyak transformator dialirkan dalam medan elektromagnet melalui sebuah pipa, kemudian minyak transformator dialirkan pada corong yang dilapisi kertas saring. Pada sampel 1 terjadi kenaikan nilai tegangan tembus 18,00 KV yang sebelumnya 13,00 KV menjadi 31,00 KV. Dan pada sampel ke-2 mengalami kenaikan sampai 18,33 kV. Hal ini membuktikan bahwa ada kandungan pada minyak transformator bekas yang sedang diujikan. Sifat Molekul air yang ada akan mengurangi tingkat kemurnian minyak transformator karena sifatnya yang mudah menghantarkan listrik, sehingga terjadi tegangan tembus walaupun nilai tegangan belum mencapai batas normalnya.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Transformator Daya

Transformator merupakan suatu alat magnet elektrik yang sederhana, andal, dan efisien untuk mengubah tegangan arus bolak-balik (AC) dari satu tingkat ke tingkat yang lainnya berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik dari medan magnet. Transformator pada umumnya memiliki beberapa komponen seperti inti yang terbuat dari sebuah besi berlapis, dan terdapat 2 kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Perubahan tegangan yang dipakai pada transformator tergantung pada jumlah rasio dari kumparan pada sisi primer dan sekunder. “(Abdul Kadir, 1989:1)”.



Gambar 2.1 Prinsip *Elektromagnetik*

Inti besi digunakan untuk mengalirkan arus AC dari kumparan primer ke kumparan sekunder, dimana pada inti besi tersebut akan membangkitkan flux magnet. Ketika terjadi perpindahan flux, maka ujung kumparan primer akan menginduksi dengan ujung kumparan sekunder, pada kejadian tersebut akan timbul beda potensial.

Istilah transformator daya digunakan untuk merujuk pada transformator yang digunakan antara generator dan sirkuit distribusi, dan ini biasanya diberi peringkat 500 kVA ke atas. Maka supaya mendapatkan kondisi layanan transformator dengan kapasitas 500kVA yang dapat

beroperasi secara aktual harus memiliki suhu lingkungan dibawah 40°C dan diatas -20°C dengan distorsi harmonik dibawah 0,05 per unit (James H, 2004: 14-15).

2.2.2 Kelas Insulasi

Menentukan *insulation class* berdasarkan tingkat pengujian yang insulasi mampu ditahannya. Level insulasi impuls dasar yang akan menilai insulasi transformator, dalam hubungan dengan rating tegangan. Secara internal, isolator kertas dianggap sebagai sistem isolasi yang tidak dapat memulihkan diri sendiri, sebagian besar terdiri dari bahan selulosa berpori yang bisa diresapi oleh media isolasi cair.

Tabel 2.1 Batas Standar Untuk Temperatur Naik di Atas Ambient

Rata-rata kenaikan suhu belitan	65°C
Kenaikan suhu <i>hot-spot</i>	80°C
Kenaikan suhu cairan atas	65°C
*Peringkat dasar sering ditentukan dan diuji sebagai kenaikan 55°C	

2.2.3 Minyak Transformator

Isolator cair memiliki 4 fungsi yaitu sebagai isolasi pada bagian yang bertegangan, sebagai pendingin transformator, pemadam *arching*, dan *partial discharge* dan pelarut gas. Beberapa alasan isolator cair digunakan yaitu (Purwasih, 1998):

- 1) Isolator cair memiliki kerapatan 1000 kali dibanding isolator padat, sehingga kekuatan dielektrik lebih tinggi.
- 2) Cairan mempunyai sifat yang dapat mengisi setiap rongga yang ada, maka isolator cair akan mengisi celah atau ruangan yang akan diisolasi.
- 3) Saat terjadi pelepasan, isolator dapat memperbaiki diri sendiri.

Minyak transformator yang layak pakai sesuai standar harus memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 2.2 Spesifikasi Minyak Isolasi Baru [SPLN 49-1:1982]

No	Sifat Minyak Isolasi	Satuan	Kelas 1	Kelas 2	Metode Uji	Tempat Uji
1.	Kejernihan	-	Jernih	Jernih	IEC 296	Ditempat/ lab
2.	Massa Jenis (20°C)	g/cm ³	≤0.895		IEC 296	Lab
3.	Viskositas 20°C	cSt	≤40	≤25		
	Kinematik -15°C	cSt	≤800	-	IEC 296	Lab
	-30°C	cSt	-	≤800		
4.	Titik Nyala	°C	≥140	≥130	IEC 296A	Lab
5.	Titik Ruang	°C	≤-30	≤-40	IEC 296	Lab
6.	Angka Kenetralan	Mg KOH/g	<0.03		IEC 296	Ditempat/ Lab
7.	Korosi Belerang	-	Tidak korosif		IEC 296	Lab
8.	Kegagalan Tembus	kV/2.5 mm			IEC 156 & IEC 296	Ditempat/ Lab
	a. Sebelum diolah		≥30		IEC 296	Lab
	b. Sesudah diolah		≥50			
9.	Fakta Kebocoran dielektrik	-	≤0.05		IEC 250	Lab
10.	Ketahanan oksidasi				IEC 474 & IEC 74	Lab
	- Angka Kenetralan	Mg KOH/g	≤0.40			-
	- Kotoran	%	≤0.10		-	-

Minyak transformator terdiri dari senyawa atom-atom C dan H, setiap transformator yang beroperasi dan mencapai suhu tinggi dan terjadi adanya busur listrik pada *on load tap changer* udara di sekitar yang lembab dapat menyebabkan timbulnya gas dan air dalam minyak transformator. Gas tersebut antara lain H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, CO dan CO₂.

Macam-macam gas tersebut yang dapat mempengaruhi nilai-nilai tegangan tembus minyak transformator dan menentukan ukuran bagus

tidaknya kualitas minyak transformator. Selain karena faktor gas, penurunan kualitas minyak isolasi transformator terjadi karena sambungan yang longgar pada *on load tap changer* sehingga muncul *arching*, karena pembebanan yang berlebih dan gangguan hubung singkat yang menimbulkan suhu tinggi pada transformator.

Tabel 2.2 Batasan Minyak Isolasi Bekas Pakai IEC 422:1989

No	Parameter	Batasan	
		Baik	Kuning Pucat
1.	Warna	Cukup	Kuning Sawo
		Tidak Baik	Coklat Kehitaman
2.	Kadar Air	<20 mg/kg untuk >170 kv	
		<30 mg/kg untuk <170 kv	
3.	Kadar Keasaman	0.5 Mgkoh/G	
4.	Tegangan Tembus	<ul style="list-style-type: none"> • 50 kV untuk tegangan >170 kV. • 40 kV untuk tegangan 70 - 170 kV. • 30 kV untuk tegangan <70 kV. 	

Suhu yang tinggi di transformator menimbulkan karbon di dalam minyak transformator, dikarenakan karbon mempunyai sifat sebagai konduktor dan tercampur pada minyak, maka kualitas isolator minyak transformator akan menurun. *Arching* antar lilitan pada transformator dapat menyebabkan terbakarnya isolator kertas pada lilitan kumparan transformator yang akhirnya menghasilkan karbon (Krinsi, 1996).

Fungsi utama minyak transformator adalah:

1. Sebagai isolator, batas minimal tegangan tembus yang dapat berfungsi sebagai isolator yaitu 30 KV.
2. Sebagai media pendingin, ketika trafo beroperasi minyak akan memanaskan dan mempunyai suhu yang tinggi, maka suhu harus dipantau terus secara kontinyu dengan rele suhu.

3. Peredam *arching* melalui sifat pendingin dan sifat isolatornya.
4. Bagian yang memiliki potensi busur api (*arching*) tidak boleh dilalui oleh gas-gas yang ditimbulkan oleh pelarut yang mudah terbakar, area tersebut meliputi bagian *OLTC*, dan sambungan-sambungan yang longgar.

2.2.4 Syarat-Syarat Minyak Isolator Yang Sesuai Standar

Dari seluruh sifat dan aturan penggunaan *isolator* minyak untuk memenuhi tujuannya sebagai *isolator* (pengisolasi), *isolator* minyak harus memenuhi persyaratan sebagai berikut (Arismunandar, 2001):

- 1) Jernih (*appearance*), tidak mengandung endapan.
- 2) Panas jenis dan daya hantar yang tinggi.
- 3) Viskositas rendah.
- 4) Berat jenis dan kerapatan rendah.
- 5) Titik nyala dan titik api tinggi (*flash point*).
- 6) Kandungan zat yang rendah dan tidak mudah terbakar.
- 7) Kestabilan kimia dan sifat penyerapan gas yang baik.
- 8) Bebas asam, kotoran dan air.
- 9) Faktor kehilangan dielektrik rendah.
- 10) Kekuatan impuls dan resistivitas tinggi.
- 11) Permittivitas, tinggi rendahnya tergantung pemakaian.
- 12) Murah dan mudah didapat.

2.2.5 Oil Quality (Karakteristik)

Minyak akan mempunyai fungsi yang baik jika perlu dilakukan *treatment*. *Treatment* ini dilakukan untuk mengendalikan fungsi minyak. Perlu dilakukan *treatment* pada minyak jika, minyak sudah terkontaminasi dan teroksidasi. *Treatment* pada minyak isolasi dapat dilakukan dengan memfilter/menyaring atau reklamasi. *Treatment* minyak berlandaskan

pada standar IEC 60422 tahun 2013 dengan membandingkan hasil uji terhadap batasan yang termuat pada standar tersebut:

Tabel 2.3 Kategori peralatan berdasarkan tegangan operasinya

Kategori	Tipe Peralatan
O	Trafo daya/reaktor dengan sistem tegangan nominal sama dengan dan diatas 400 kV
A	Trafo daya/ reaktor dengan sistem tegangan nominal 170 kv<U<400kV
B	Trafo daya/reaktor dengan sistem tegangan nominal di atas 72,5 kV dan sampai dan termasuk 170 kV
C	Trafo daya/reaktor untuk aplikasi LV/LV misalnya sistem tegangan nominal sampai dengan termasuk 72,5 kV
F	Diverter tank OLTC, termasuk combined selector, diverter tank.

Catatan:
Tank selector pada beban tap-changer termasuk dalam kategori yang sama seperti yang terkait trafo.

Tabel 2.4 Justifikasi Kondisi pada pengujian kualitas minyak

Jenis Pengujian	Kategori	Kondisi		
		Baik	Sedang	Buruk
Warna	All	Jernih dan tidak terlihat kontaminasi		Gelap dan atau keruh
Kandungan Air (mg/kg pada temperatur operasi trafo)	O,A	<15	15-20	>20
	B	<20	20-30	>30
	C	<30	30-40	>40
	F	Tindakan dibutuhkan >40		
Keasaman (mgKOH/goil)	O,A	<0.10	0.10-0.15	>0.15
	B	<0.10	0.10-0.20	>0.20
	C	<0.15	0.15-0.20	>0.30
	F	Bukan merupakan tes rutin		
	F	Tidak diterapkan		
Tegangan Tembus (Kv)	O,A	>60	50-60	<50
	B	>50	40-50	<50
	C	>40	30-40	<30
	F	<30kV untuk OLTC pada aplikasi titik belitan bintang		

Terdapat perbedaan antara analisa kadar air dalam minyak yang tercantum pada tabel diatas dengan standar *IEC* (*IEC 60422* tahun 2005). Analisa dengan standar *IEC* harus diperbaiki menjadi 20°C. Hasil pengujian kadar air, dengan aturan kadar air sebagai berikut:

Tabel 2.5 Presentase Saturasi Air Pada Minyak (*IEC 60422 2013*)

Persentase saturasi air dalam minyak (%)	Kondisi dari isolasi selulosa
<5	Isolasi dalam kondisi kering
5<20	Isolasi dalam kondisi cukup basah (moderat)
20-30	Isolasi basah
>30	Isolasi dalam kondisi terlalu basah.

Pengujian kadar air pada minyak dilakukan bila pada isolasi kertas mempunyai kondisi cukup basah atau lebih buruk lagi. Indikasi terjadi kerusakan isolasi kertas dengan melihat persentase saturasi air dalam minyak yang berkisar antara 15%-20%.

Tabel 2.6 Klasifikasi Validitas Data Antara Pengujian Kadar Asam dan *IFT*

Kategori	Kadar Asam (mg KOH/g)	<i>IFT</i> (Mn/m)
1	<0.05	20-43
2	0.051-0.1	17-34
3	>0.11	15-27

2.2.6 Standar Warna Minyak Transformator

Pengujian warna minyak transformator mengacu kepada standar *ASTM D1500* untuk menentukan layak atau tidaknya isolasi minyak transformator. Cara pengujian warna minyak ini dengan membandingkan warna minyak yang terpakai dengan minyak baru, penentuan warna minyak dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 2.7 Kategori Warna Minyak Isolasi

No	Warna	Diagnosa
1.	Bagus Kuning Pucat	Pendingin dan isolasi baik
2.	Umum Kuning Muda	Terjadi endapan (<i>sludge</i>) yang membaur di minyak yang akan menyebabkan kekuatan kertas (<i>IFT</i>) menurun.
3.	Sedang Kuning Terang	Terjadi endapan tipis pada lilitan, <i>sludge</i> , Hal ini akan menjadi penyebab gangguan.
4.	Buruk Kuning Sawo	Hampir semua trafo pada keadaan ini terdapat endapan <i>sludge</i> pada lilitan dan inti.
5.	Sangat Buruk Coklat Sawo	Endapan <i>sludge</i> akan beroksidasi kemudian mengeras dan terjadi juga di isolasi kertas
6.	Sangat Buruk Sekali Coklat Kehitaman	<i>Sludge</i> menyumbat sirip-sirip pendingin yang menyebabkan kenaikan temperatur sampai 20°C
7.	Minyak Kelas 7 (<i>Crude Oil</i>) Hitam	Diperlukan suatu cara untuk menghilangkan <i>sludge</i> . Pada kondisi ini transformator harus di <i>overhaul</i> .

2.2.7 Proses Percepatan Penuaan Thermal

Durasi pemakaian transformator yang lama akan mengakibatkan kerusakan pada isolasi minyak. Pengaruh kerusakan ini disebabkan karena adanya laju degradasi yang bergantung pada tekanan elektrik, mekanik, dan suhu thermal. Pengaruh lain juga ditentukan dari struktur molekul dan komposisi. Minyak akan mengalami kerusakan jika sifat fisik, elektrik dan kimia mempunyai suhu yang berlebih dan berkesinambungan atau mempunyai durasi waktu yang lama. Oksidasi terjadi karena disebabkan oleh laju degradasi, yang dimana oksigen berinteraksi dengan hidrokarbon yang terluar dari udara bisa menimbulkan proses oksidasi dan memicu kegagalan isolasi yang dikarenakan adanya endapan senyawa asam.

2.2.8 Teori Kegagalan Isolasi Cair

Ilmu yang didalami tentang kegagalan isolasi cair kurang diperhatikan dibandingkan pada kegagalan isolasi padat dan gas. Sudah

banyak sekali penelitian yang dilakukan untuk meneliti penyebab kegagalan isolasi dan menjelaskan kegagalannya tetapi saat ini belum didapatkan teorinya secara mendalam dengan keadaan sebenarnya.

Faktor ketidakmurnian merupakan pengaruh terjadinya kegagalan isolasi cair. Jika kegagalan ini berlanjut maka akan menyebabkan relai bekerja. Seperti relai buchhol, yang bekerja karena disebabkan adanya gas-gas dan gelembung gas yang tersusun dan terus meningkat kemudian dekomposisi padat terbentuk. Kondisi akan menyebabkan terjadinya kegagalan isolasi cair. Dibawah ini merupakan teori kegagalan isolasi, yaitu:

- Mekanisme Partikel Melayang

Pada benda cair sering terdapat beberapa partikel melayang padat yang kadang tercampur dan tidak dapat dihindarkan. Kedatangan partikel padat ini menyebabkan ketidakmurnian pada minyak. Permittivitas partikel tersebut ϵ_2 berbeda dengan permittivitas cairan ϵ_1 . Jika diasumsikan bahwa ketidakmurnian berupa partikel bulat dengan jari-jari r dan medan yang terapkan adalah E , maka gaya F yang dialami oleh partikel tersebut dirumuskan pada persamaan (2.1) sebagai berikut:

$$F = \frac{1}{2r^3} \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \text{ grad } E^2 \dots\dots\dots (2.2.1)$$

dengan :

- F = gaya yang dialami partikel (N)
- r = jari-jari partikel (m)
- E = medan listrik (N/C)
- ϵ_1 dan ϵ_2 = Permittivitas cairan dan partikel (F/M)

Jika $\epsilon_2 > \epsilon_1$, gaya akan menuju ke area dengan tekanan maksimum, sebagai contoh terdapat partikel butiran kertas pada

minyak. Disisi lain jika kasusnya adalah berupa gelembung gas pada cairan $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ gaya akan menuju ke area dengan tekanan minimum. Ketika tegangan *DC* ataupun tegangan *AC* beroperasi dengan durasi yang lumayan lama maka akan membuat gaya ini mendorong partikel kertas dengan tekanan maksimum mengarah ke area. Jika terjadi pengumpulan partikel-partikel yang banyak dan membentuk rangkaian yang stabil dan terbentuk jempatan diantara celah elektroda, maka akan timbul tembus listrik diantara elektroda tersebut.

- Teori Kegagalan Karena Adanya Gelembung Gas

Saat trafo bekerja akan mengalami *hidrostatik* yang akan mempengaruhi ketahanan bahan dielektrik. Terdapat beberapa proses yang telah disarankan saat terjadi gelembung gas menurut “M.S. Naidu, V. Kamaraju, *High Voltage Engineering* (New York: McGraw-Hill 1996 102)”, yaitu:

- a. Kantong gas pada permukaan elektroda
- b. Gaya tolak *elektrostatik* antara ruang muatan yang mungkin cukup untuk mengatasi tekanan permukaan.
- c. Produk gas karena penguraian molekul cairan disebabkan tumbukan elektron.
- d. Penguapan cairan karena puluhan jenis korona dari titik yang tajam dan ketidakberaturan pada permukaan elektroda.

Sedikit saja terbentuk sebuah gelembung, akan memperpanjang masalah dan menuju ke medan listrik karena pengaruh *elektrostatik*. Jumlah gelembung tidak bertambah selama menuju ke arah medan listrik. *Insulation Failure* terjadi saat jatuh tegangan di sepanjang panjang gelembung menjadi sama dengan nilai minimum pada kurva Paschen untuk gas di dalam gelembung.

Berikut persamaan medan kegagalan dirumuskan:

$$E_0 = \frac{1}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \left\{ \frac{2\pi\sigma(2\epsilon_2 + \epsilon_1)}{r} \left[\frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{E_b}{2rE_0}} - 1 \right] \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(2.2)$$

dengan:

- sigma = tekanan permukaan cairan (Pascal)
- ϵ_1 dan ϵ_2 = permitivitas cairan dan gelembung gas (F/m)
- R = jari-jari awal gelembung diasumsikan bulat (m)
- Vb = drop tegangan pada gelembung (V)

Dari persamaan (2.2) tekanan hidrostatik/tekanan permukaan dan suhu cairan ini dapat mempengaruhi kekuatan dielektrik dan nantinya akan menentukan ukuran awal gelembung yang terjadi.

Untuk keadaan transformator ketika bekerja sehari-hari akan mengalami kegagalan, terutama kegagalan bahan isolasi. Kegagalan ini lebih difokuskan dengan adanya unsur-unsur lain yang tercampur pada bahan (minyak). Unsur ini dapat berasal dari hasil kontaminasi atau akibat minyak yang tidak murni selama proses pembuatan dari pabrik.

- Pengaruh Suhu Minyak dan Jumlah Kandungan Air

Tegangan tembus pada minyak transformator dapat terjadi jika didalam minyak terdapat bahan yang tidak diinginkan seperti air. Kandungan air pada minyak isolasi perlu dihindari, karena walau jumlah air tersebut hanya sedikit, tetapi itu lebih berbahaya daripada zat pengotor lainnya. Alasannya karena air mempunyai sifat konduktor yang baik dalam menghantarkan aliran listrik.

Proses oksidasi inilah yang menyebabkan munculnya air pada minyak isolasi dan dapat menurunkan umur minyak.

Terjadi penuaan bahan isolasi disebabkan karena adanya air tersebut, air dapat mempengaruhi kekuatan *dielektrik* bahan isolasi, dengan kondisi suhu minyak yang tinggi ini dapat memunculkan gelembung. Pada kasus yang parah transformator dapat berhenti beroperasi dan tidak menjalankan fungsinya jika di dalam minyak isolasi tersebut terdapat banyak air dalam isolasi. Dengan ini air relatif akan berkurang dengan menaikkan suhu, dengan suhu yang semakin tinggi tegangan tembus menjadi semakin tinggi.

Kandungan air relatif minyak adalah perbandingan antara *absolute water content* dengan *water solubility* (wt_1) minyak. *Water Solubility* adalah daya larut minyak yang akan naik karena dipengaruhi kenaikan suhu. Berikut adalah persamaan kandungan air relatif dan *Water Solubility*.

$$wt_r = \frac{wt_{abs}}{wt_0 \exp\left(\frac{-H}{T}\right)} \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan :

- wt_0 dan H = parameter minyak yaitu $1,92 \times 10^6$ dan 3805
- wt_{abs} = *absolute water content*

Persamaan pada (2.3) diatas adalah perhitungan kandungan air relatif (wt_r) dan persamaan pada table (2.4) diatas adalah perhitungan *water solubility* (wt_1) minyak.

Kandungan air relatif akan secara signifikan berkurang jika suhu transformator naik, sehingga tegangan tembus minyak menjadi lebih tinggi.

Lance pernah mengungkapkan bahwa terdapat suatu hubungan antara nilai daya larut dalam minyak dengan *relative saturation (RS)*.

Konsep yang digunakan untuk menilai sistem transformator memiliki kondisi basah atau kering kadang kala sukar dimengerti, konsep tersebut merupakan konsep *solubility saturation*. Sedangkan arti *Solubility* adalah jumlah total kadar air dalam minyak yang bisa larut pada suhu tertentu. Secara mendalam bahwa daya larut kadang memiliki nilai yang tidak konstan di dalam minyak tetapi dapat berubah dengan suhu yang berbeda-beda. Maka, jika jumlah air yang larut meningkat itu karena suhu minyak meningkat. Pada tabel (2.9) dibawah memberikan informasi kandungan air dalam minyak yang dipengaruhi oleh suhu:

Tabel 2.7 Kandungan Air Pada Minyak

Suhu Minyak (°C)	Kandungan Air Pada Minyak (ppm)
0	22
10	36
20	55
30	83
40	121
50	173
60	242
70	331
80	446
90	592
100	772

Berikut adalah persamaan daya larut minyak mineral:

$$\log S_0 = -\frac{1567}{K} + 7.0895 \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan :

S_0 = daya larut air di dalam minyak mineral(ppm)

K = suhu (*Kelvin*)

Relative Saturation (RS) adalah jumlah kadar air yang sebenarnya di dalam minyak isolasi yang memiliki hubungan dengan tingkatan daya larut pada suhu tinggi minyak tertentu. Hasil yang didapat setelah membandingkan konsentrasi air relatif di dalam minyak dengan daya larut atau konsentrasi air di dalam minyak akan menunjukkan kejenuhan relatif dan dapat ditahan pada suhu pengukuran. Persamaan (2.6) adalah persamaan *Relative Saturation* dirumuskan sebagai berikut:

$$RS = W_c/S_0(100\%) \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan:

W_c = Konsentrasi air relatif di dalam minyak (ppm)

S_0 = daya larut air di dalam minyak (ppm)

2.3 Metode Analisis Kandungan Air

Hitung air dalam sampel, sebagai berat atau volume persen, sesuai dengan dasar pengambilan sampel diambil, sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Water, \%} \left(\frac{V}{V} \right) \\ = \frac{(\text{Volume air di trap, mL}) - (\text{Air di pelarut kosong, mL})}{\text{Volume air dalam sampel uji}} \times 100\% \end{aligned} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\begin{aligned} \text{Water, \%} \left(\frac{V}{m} \right) \\ = \frac{(\text{Volume Air di Trap, mL}) - (\text{Air di Pelarut Kosong, mL})}{\text{Massa sampel Uji}} \times 100\% \end{aligned} \dots\dots\dots(2.7)$$

2.4 Analisis Kekuatan Dielektrik

Kuat medan elektrik tertinggi dapat diketahui dengan menggunakan persamaan dibawah ini, persamaan dibawah digunakan untuk mengetahui kekuatan suatu bahan isolasi ketika memikul beban yang tinggi (*dielectric strength*):

$$E = \frac{V_{BD}}{d} \dots\dots\dots(2.9)$$

dengan

E =kekuatan dielektrik (kV/mm)

V_{BD} =tegangan tembus dielektrik/material isolasi (kV)

d =ketebalan isolasi (mm)

BAB III